

37. Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Had- és Rendészettudományi Szekció
Budapest, 2025. április 22-24.
Nemzeti Közsolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar

A T-72-es harckocsi légénységvédelmének fejlesztése új eljárásokkal

Jelige: *Áttörés a láthatáron!*

Pályamunka lezárásának időpontja: 2024.05.

2024.

A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM ÚNKP-23-1-II-19 KÓDSZÁMÚ ÚJ
NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS
INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL
KÉSZÜLT.



Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk kifejezni hálánkat és köszönetünket három kiváló szakembernek, akik nélkülözhetetlen segítséget nyújtottak munkánkhoz. Köszönet illeti Dr. Szűcs Endre adjunktus urat, aki szakértelmével és értékes tanácsaival jelentős mértékben hozzájárult kutatásunk sikeréhez.

Mélyen hálásak vagyunk Dr. Fábián Enikő Réka egyetemi docens asszonynak, akinek szakmai irányítása és inspiráló ötletei elengedhetetlenek voltak a projekt megvalósítása során.

Végezetül, szeretnénk köszönetet mondani Virág Zoltán úrnak, a HM Currus Zrt. műszaki igazgatójának, aki ipari szakértelmével és támogatásával kulcsszerepet játszott a kutatásunk elméleti alkalmazásának előmozdításában. Mindhármuk hozzájárulása elengedhetetlen volt eme tudományos munka elkészítéséhez.



Tartalomjegyzék

A kutatásunk célja	1
A T-54/55 fejlődése és jelentősége	1
A T-72-es Globális Hatása és Öröksége.....	4
Páncélzat.....	5
Lőszertípusok	12
A fejlesztési javaslat tartalma	19
Használt eszközök	19
Felmérés, fejlesztési iránymegadások	20
A páncél kialakításához az anyagok kiválasztása. Kísérleti anyagok	21
Szimulációk	26
Az eredmények kiértékelése, további fejlődési irány	31
Irodalomjegyzék	32
Ábrajegyzék.....	34

A kutatásunk célja

Miután részletesen ismertettük a különböző páncélzat- és löszertípusokat, rátérünk, hogy ez miért is volt lényeges. Az egész világon a 40-50 éves harckocsik modernizálása zajlik különböző megoldásokkal a tüzerő, a mobilitás és a páncélzat terén. A Magyar Honvédség jellege okán kisebb haderőnek számít limitált technikai háttérrel. Igaz az elmúlt években többek között igyekszik modernebb harckocsikat és lövészpáncélosokat beszerezni, ám a véges források miatt továbbra is lényeges marad az akár elavultnak is tekinthető technika. Ilyen technikának tekintjük a szovjet eredetű T-72M1-es harckocsit is. A 34 darab használatban és 78 db tartalékban lévő jármű továbbra is hazánk páncélos haderejének a gerincét képezi. Úgy gondoljuk, hogy egy harckocsinak a legértékesebb és legfontosabb része a legénység. Az elmúlt időszakban közeli konfliktusban láthatjuk szerepelni a T-72-eseket és a harckocsicsalád többi tagját (T-64, T-80, T-84, T-90), számos ütközetben. A harckocsi, mint fegyverrendszer nem sérthetetlen és sok száz jármű került és kerül veszteséglistára, szerencsére gyakran a legénység sikeresen elhagyja a járművet, még mielőtt késő lenne. Azonban túl sok esetben láthatjuk, hogy esélyük sem volt a menekülésre, vagy a még harcképes állapotban lévő harckocsi elveszíti egy vagy több embert a személyzetéből. Mivel a ez a szakterületünk, legyen az épület-, munkavégzés-, információ- vagy tűzbiztonság, végső soron az ember biztonsága célunk. Ezért kezdtük meg és vittük véghez ezt a kutatási folyamatot, hogy a Magyar Honvédség és tágabb értelemben a NATO harckocsizói számára nagyobb biztonságot tudjunk nyújtani. Ezt a hazai T-72M1-es típusú járművek példáján mutatjuk be, de bízunk benne, hogy egy általánosabb érvényű megoldást sikerült találnunk.

A hidegháború időszaka jelentős változásokat hozott a világ geopolitikai színterén, amelyek közvetlenül befolyásolták a katonai technológiák, így a páncélos harcjárművek fejlődését is. Ebben az időszakban a Szovjetunió jelentős erőforrásokat fektetett be haditechnikai fejlesztéseibe, különös tekintettel a páncélos harcjárművekre, amelyek alapvető eszközeivé váltak a szovjet katonai doktrínának. A T-54/55, T-64, és T-72 tankok fejlesztése és alkalmazása nemcsak a szovjet hadsereg harci képességeit formálta meg, hanem a globális katonai gondolkodást is befolyásolta.

A T-54/55 fejlődése és jelentősége

A T-54/55 páncélosok kifejlesztése az 1950-es években a szovjet páncélos hadviselés alapkövét képezte. Ezek a tankok az első olyan tömeggyártott szovjet harckocsik voltak, amelyek széles

körben elterjedtek a Varsói Szerződés országaiban, valamint a Szovjetunió szövetségesei között az egész világon. Tervezési filozófia és technikai jellemzők: A T-54/55-ösök tervezése során a szovjet mérnökök elsődleges célja egy olyan közepes tank kifejlesztése volt, amely egyensúlyban tartja a tüzerőt, a páncélzatot és a mobilitást. Ezek a tankok az elsők között voltak, amelyeket teljes körű NBC (nukleáris, biológiai, kémiai) védelemmel szereltek fel, reflektálva a hidegháborús korszak atomháborúval kapcsolatos félelmeire.[12]

A T-54/55-ös sorozat gyors adaptációja és több változatban történő gyártása lehetővé tette a Szovjetunió számára, hogy dominálja a páncélos hadviselést az 1960-as és 70-es években. A tankok részt vettek számos regionális konfliktusban, amelyek során bizonyították rugalmasságukat és megbízhatóságukat. A T-54/55-ösök tervezési koncepciója és harctéri teljesítménye jelentős hatást gyakorolt a későbbi szovjet tankfejlesztésekre, beleértve a T-64 és T-72 típusokat. Ezek a tankok továbbfejlesztett változataikban örökölték elődeik megbízhatóságát, miközben jelentős technológiai innovációkat is bevezettek.[3]

A T-64-es kifejlesztése a 60-as évek elején kezdődött, és ez volt az első olyan harckocsi, amely a kompozit páncélzatot és a többsövű löszertároló rendszert alkalmazta, ezáltal jelentősen növelve a túlélőképességet és csökkentve a sérülékeny pontokat. A tervezés során kiemelt figyelmet fordítottak a mobilitásra és a tüzerőre is, amelyet egy új, nagy teljesítményű 125 mm-es sima csövű ágyú biztosított, amely lehetővé tette a páncéltörő lövedékek és irányított rakéták indítását is. Egyik legjelentősebb innovációja a T-64-nek az volt, hogy bevezette az automatizált löszertöltő mechanizmust, amely lehetővé tette a legénység létszámának csökkentését három főre anélkül, hogy csökkent volna a tűzgyorsaság. Ez a fejlesztés jelentős előrelépést jelentett a harckocsi tervezésben, mivel lehetővé tette a tornyok méretének és súlyának csökkentését, miközben növelte a jármű mozgékonyágát és reakcióképességét.

A T-64 modell azonban nem volt mentes a kezdeti problémáktól, többek között a megbízhatósági és karbantartási kérdésekkel küzdött, amelyek korlátozták a széles körű bevetését. Ezek a problémák későbbi változatokban kerültek kiküszöbölésre, ami hozzájárult a típus hosszú távú sikeréhez a Szovjetunióban és különböző exportpiacokon egyaránt.[13]

A T-64 harckocsi fejlesztése és bevezetése a szovjet páncélos doktrína lényegi eleme volt, amely új mércét állított a védelem, a mobilitás és a tüzerő terén. Ez a modell jelentette a technológiai átmenetet a korábbi T-54/55 modellekről a későbbi, még fejlettebb T-72 és T-80

harckocsikra, amelyek szintén hordozták ezeket az innovatív jellemzőket, és továbbfejlesztett változataik ma is a világ számos országának fegyverzetében megtalálhatóak.[17]

A T-64-es tank, bár kezdetben kihívásokkal küzdött, végül kulcsfontosságú lépés volt a modern páncélozott harcjárművek fejlődésében, és alapvetően befolyásolta a későbbi szovjet és orosz tanktervezést, meghatározva ezzel a hidegháborút követő korszak páncélos harcjárműveinek fejlődési irányát.

A T-72 harckocsi bevezetése jelentős mérföldkő volt a szovjet tankgyártás történetében. Ez a modell az 1970-es évek elején jelent meg, és gyorsan a Szovjetunió és szövetségesei egyik legfontosabb páncélos eszközévé vált. A T-72 fejlesztésének alapvető célja egy olyan harckocsi létrehozása volt, amely ötvözi a T-64-es technológiai újításait a T-54/55 modellek megbízhatóságával és egyszerű karbantartásával, miközben fenntartja a tömeggyártás előnyeit. A T-72-es a korábbi szovjet harckocsikhoz képest számos technikai fejlesztést hozott. Az egyik legjelentősebb újítás a többrétegű kompozit páncélzat bevezetése volt, amely jelentősen növelte a túlélőképességet a modern páncéltörő fegyverekkel szemben. A harckocsi 125 mm-es sima csövű ágyúja, amely képes volt irányított rakétákat is indítani, tovább erősítette a tüzerőt, miközben az automatizált lőszertöltő rendszer megtartása lehetővé tette a gyors tüzelést és a légénység létszámának csökkentését.

A mobilitás terén a T-72 egy megbízható, nagy teljesítményű dízelmotort kapott, amely javította a manőverező képességet és növelte a maximális sebességet, mindemellett a járművet könnyebbé és gyorsabbá téve a harcúterén. Az új hűtő- és szűrőrendszerek tovább javították a harckocsi sivatagi és poros körülmények közötti alkalmazhatóságát, amely kulcsfontosságú tényező volt számos exportpiac számára. A T-72-es széles körű alkalmazása a globális konfliktusokban, valamint az exportpiacokon való jelenléte miatt a harckocsi az egyik legismertebb és legelterjedtebb páncélos típusná vált a világon. A változatos változatai és modernizált verziói biztosítják, hogy a T-72 továbbra is releváns maradjon a modern hadviselésben, annak ellenére, hogy több mint négy évtizede van jelen a katonai technológia frontján.[18]

A T-72 harckocsi sikere nem csak a technológiai fejlesztéseknek köszönhető, hanem annak a képességének is, hogy megfeleljen a különböző országok változatos követelményeinek. Ez a rugalmasság és alkalmazkodóképesség a tervezés minden szintjén megmutatkozik, a páncélzattól és fegyverzettől kezdve a mobilitáson át a karbantartás egyszerűségéig. Mindezek

hozzájárultak ahhoz, hogy a T-72 a hidegháború egyik legjelentősebb páncélos ikonjává váljon, amelynek hatása a mai napig érezhető a modern harctéri doktrínákban és fegyverrendszerek fejlesztésében. A T-72 és annak változatai tehát nem csupán a szovjet, hanem a globális páncélozott hadviselés történetének meghatározó elemei, amelyek jelentős hatással voltak a katonai stratégiákra és taktikákra szerte a világon. A harckocsi fejlesztése és alkalmazása példaként szolgál arra, hogyan lehet a technológiai innovációkat és a gyártási hatékonyságot ötvözni a katonai képességek maximalizálása érdekében.

A T-72-es Globális Hatása és Öröksége

A T-72-es bevezetése jelentős változásokat hozott a világ páncélos doktrínáiban. Azáltal, hogy ez a típus széles körben exportált lett, döntő hatással volt számos ország hadseregének képességeire, és központi szerepet játszott több regionális konfliktusban. A harckocsi képességei és hatékonysága valós harci körülmények között került tesztelésre, amelyek során kiemelkedően teljesített, de egyben felfedte korlátait is szemben a modern anti-tank eszközökkel és taktikákkal. A T-72-es technológiai újításai, mint a kompozit páncél és az automatizált lőszertöltő rendszer, meghatározó irányokat szabtak a következő generációs harckocsik tervezéséhez. Ez a modell inspirálta a továbbfejlesztett orosz harckocsik, például a T-90 és az Armata sorozat fejlesztését, amelyek tovább viszik a T-72-es által megkezdett innovációs vonalat. A T-72-es széles körű exportja és alkalmazása globális szinten számos konfliktusban tette lehetővé annak megértését, hogy a modern páncélozott hadviselés milyen kihívásokkal jár. A harckocsi részvétele az iraki, szíriai és a volt jugoszláv területeken zajló konfliktusokban rávilágított arra, hogy a páncélozás, mobilitás és tűzerő mellett a légénység kiképzése és a taktikai alkalmazás mennyire döntő fontosságú a sikeres hadműveletekben.[15]

A T-72 továbbra is jelen van a modern hadszíntéren, köszönhetően a folyamatos modernizációs programoknak, amelyek célja a harckocsi képességeinek növelése a modern fenyegetésekkel szemben. Ezek a frissítések magukban foglalják az elektronikus hadviselési rendszerek, a fejlett páncéltechnológiák és a pontosabb tűzvezetési rendszerek bevezetését, amelyek célja, hogy fenntartsák a T-72 relevanciáját a 21. században is.

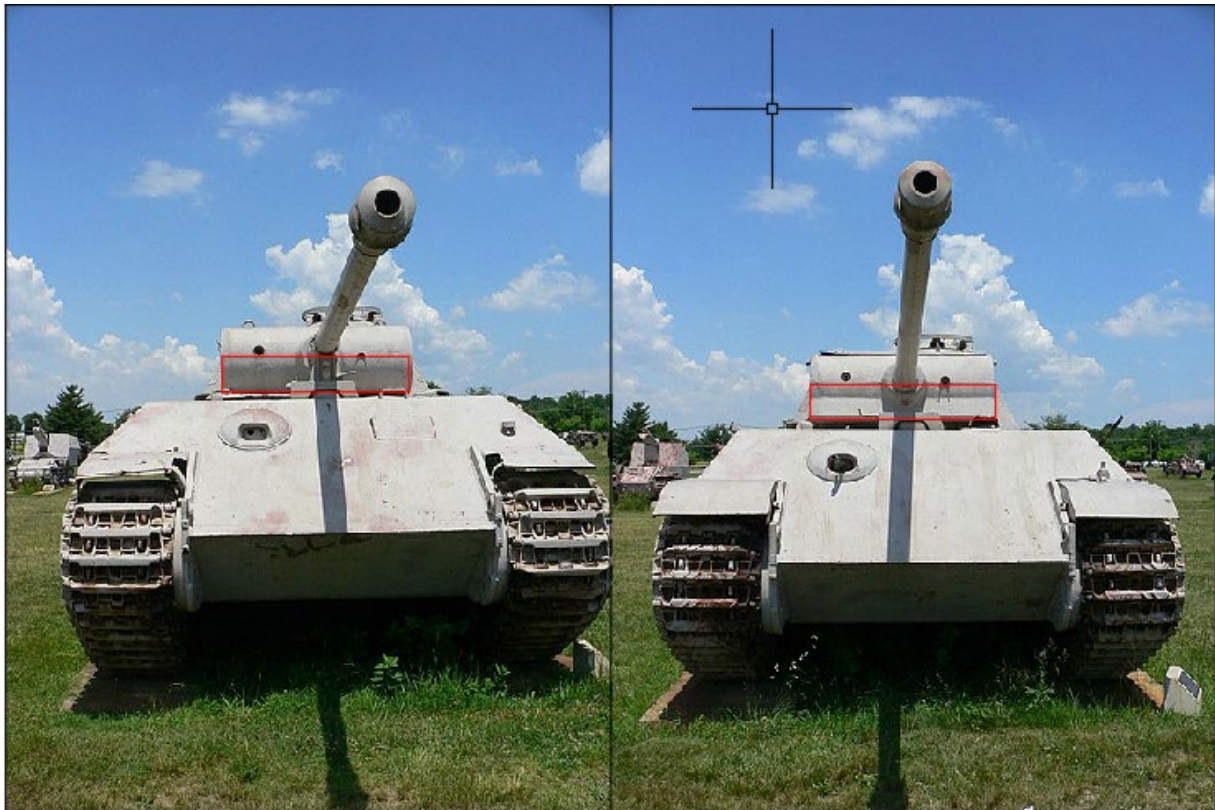
A T-72-es harckocsi története és fejlesztése szemléletes példája annak, hogyan alakítja a technológiai innováció és stratégiai alkalmazás a modern hadviselést. E harcjármű öröksége túlmutat a hidegháború páncélos ütközetein, és továbbra is meghatározó tényező a globális biztonságpolitikában és katonai stratégiákban. Azok a leckék, amelyeket a T-72-es tervezése,

bevetése és modernizációja során tanultak, továbbra is értékes útmutatást nyújtanak a jövőbeli harcjármű-fejlesztések számára, biztosítva, hogy a páncélozott harc eszköztára fejlődni tudjon a változó hadviselési környezetben.[8]

Páncélzat

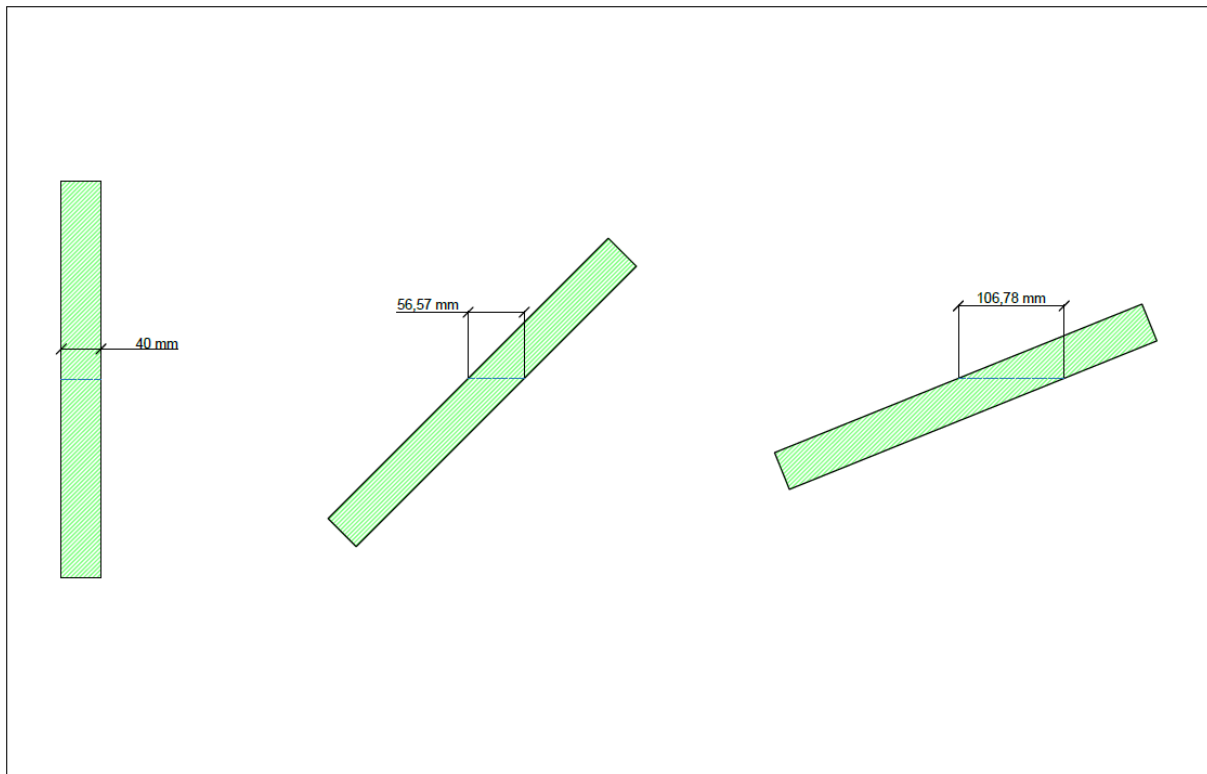
A harckocsik egyik legfontosabb része a páncélzatuk. A legtöbb esetben ez a védettség szemből a legerősebb, oldalról valamivel gyengébb, de továbbra is hatásos, a hátsó oldalon, a haslemezen és a felső részeken a leggyengébb, hiszen innen várható legkevésbé támadás. Igaz, az utóbbi időkben felülről drónok formájában és alulról aknák formájában nőtt a fenyegetés ezeken a részeken. Ebben a fejezetben ismertetjük a harckocsi páncélzattípusokat, fejlődésüket és az alkalmazási területüket. Alapvetően acélból épülnek a járművek, ám alkalmaznak egyéb kompozitokat és fémeket is, amelyek hatékonyabbak bizonyos fenyegetések ellen molekula szerkezetük és mechanikai tulajdonságaik okán.

A harckocsi kialakításánál nagyon fontos a felületek formájára és méretezésre odafigyelni. A páncélzatot (metszeti nézet szerint) konvex formákból kell alkotni, mivel nem átütő és lepattanó találat esetében a lövedék megváltoztatja mozgásának irányát és ez az irány a nem a jármű felé vezet. Ezzel szemben ha konkáv formák jelen vannak, esély van a „lövedékcsapda” fenomén kialakulásának. Ez azt jelenti, hogy a találat után az egyébként viszonylag egyben maradó lövedék az útját a páncél formájából adódóan egy gyengébben védett terület felé (általában a páncéltest teteje) veszi az irányt, ahol eléri a páncélzat átütését ezzel rombolást idézve elő a harckocsi belsejében. Az ilyen kialakításbeli hibákra kiváló példák a Sonderkraftfahrzeug 182 „Tiger Ausf. B”, a Sonderkraftfahrzeug 182 „Panther”, az M26 Pershing és a KV-1 típusok korai tornyai mind rendelkeztek ilyen tervezési hibával, mely nem egy jármű veszteséglistára kerülését idézte elő. Ezzel együtt egy kevésbé egyértelmű szempont is szerepet játszik a hatékony páncélzat kialakításánál. A felületeknél törekedni kell arra, hogy azok minél szabályosabbak legyenek, és minél kevésbé törjük meg a felületük folytonosságát. Az ilyen törések gátolják, hogy egyformán oszoljon el a becsapódási energia. Ennek következtében feszültség gócpontok jelenhetnek meg, ahol akár törések jelentkezhetnek ezzel megszüntetve a védelmet.[1]



[1.Kép] A piros téglalappal jelölt terület volt az „A” modellnél a lövedékcsapda.

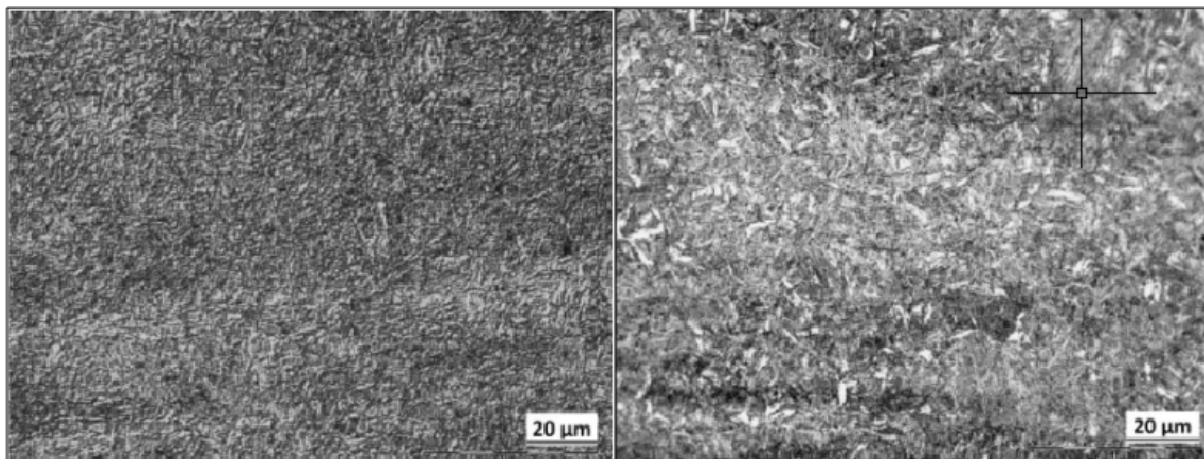
A páncéllemezek dőlési szöge egy jelentős karakterisztikája a harckocsiknak. Minden olyan lemezt, amely 90° -nál hegyesebb szöget zár be a vízszinttel, azt döntött páncélnak nevezzük. Ilyen kialakítást azért érdemes használni, mert találat esetén a lövedékeknek nem csak nagyobb utat kell megtenniük a beltérig, hanem a mozgásuk irányát is változtatja a lemez alakja. Ennek köszönhetően a kellően döntött páncélról a lövedék „lecsúszhat” belső sérülések okozása nélkül. Ekkor az a jelenség is felléphet, hogy a lövedék a becsapódás erejétől, és hogy a hosszanti tengelyével nem merőlegesen éri a páncélzatot, az apró darabokra szakad. További előnye a döntött páncélnak, hogy ugyanakkora effektív védelem eléréséhez kevesebb anyag felhasználására van szükség ezzel csökkentve a jármű tömegét és az előállítási költségeket. A hatékonyság demonstrációja érdekében vegyünk példának egy 45 mm vastag lemezt. Ennek, ha függőleges a valódi értéke 45 mm marad. Ha 45° -ban megdöntjük, akkor ez az érték megnövekszik 56,57 mm-re, ha pedig mint a T-72-es esetében 68° -ra növeljük ezt a döntést a függőlegeshez képest, akkor az egészen elképesztő 106,78 mm-es effektív értéket kapjuk.



[2.Kép] 45 mm-es acéllemez effektív értéke függőlegesen, 45°-ban és 68°-ban döntve.

A harckocsik bő százéves történelme során a legelterjedtebb páncélzattípus az acél hengerelt homogén páncél volt (továbbiakban RHA – Rolled Homogeneous Armor). A lemezeket melegen hengerelik, majd a kívánt méretekre alakítva régebben szegecseléssel, újabban hegesztéssel rögzítik egymáshoz. A szegecseléssel eljárás mellett, hogy gyengébb rögzítésnek bizonyult a legkomolyabb akadály az volt, hogy egy egyébként nem átütő találatnál is a szegecs belső oldala nagysebességű repesszé tudott válni veszélyeztetve a legénységet és a berendezéseket. Az RHA az elavult cementált acélt váltotta ki. Magas szakítószilárdsága és folyáshatára lehetővé teszi, hogy a becsapódási energiát rugalmasan oszlassa el. Az amerikai MIL-A-12560 szabványban leírt tulajdonságai szerint az anyag 302-400-as értékek között alakul a Brinell-keménységi skálán, melyet a HBW10/3000-W eljárással mérnek.[9] Az anyag széntartalma 0,20%. Főbb ötvöző anyagai a króm, a mangán és a szilícium 1,08%, 0,57% és 0,35%-al.[2] Az RHA szövetelemei edzés és normalizálás hatására a felületen középpontos köbös ausztenitből erősen feszült, térben középpontos tetragonális martenzitté alakulnak át ezzel javítva az anyag felületének ballisztikus tulajdonságait. Mivel nem hajlítható jól, ezért inkább szögletes formákat lehet elérni a felhasználásával, erre kiváló példa a második világháborúban használt német harckocsik, melyek szinte kivétel nélkül téglatestté formált hengerelt páncélzatzból készültek hegesztéssel. Ekkor még nem volt igazán fejlett a hegesztési

technológia, ezért a vastag páncélt nem átütő találattal küzdötték le a szövetséges harckocsik és páncélelhárító lövegek, hanem az ismételt találatok hatására a hegesztési varratok mentén ment tönkre az ismételt igénybevétel miatt. Az általunk vizsgált T-72M1-esnek a kocsiteste is nagyrészt hengerelt homogén páncélból készült, bizonyos területeken lévő kompozit rétegektől eltekintve, melyeket később tárgyaljuk.[3]



[3.Kép] Az RHA és az AR500 szövetszerkezete.

Egy változata az RHA-nak, de ennek ellenére külön kategóriaként kezeljük a felületkeményített homogén vagy másnéven a nagykeménységű páncélt. Ezen eljárás során edzéskor jóval magasabb hőmérsékletre hevítik az anyagot -közel olvadáspontig-, majd olajfürdőben lehűtve kezelik azt. A módszer előnye, hogy nagyobb keménységű lesz az acél az 500-550 HBW10/3000 -W tartományban. Ebből következik, hogy nagyobb eséllyel robban szét szilánkokra a lövedék, amikor a páncéllal érintkezik, ugyanakkor hegesztéskor és becsapódáskor szintén nagyobb a veszélye annak, hogy a lemez elreped, majd a munkások és a legénység irányába halálos sebességgel repeszeket szór. A nagykeménységű acél főleg a második világháborúban szovjet harckocsik alapanyagául szolgált, melynek az oka az volt, hogy szerényebb minőségű és konzisztenciájú anyagot tudtak előállítani, de az erős felületkezeléssel közel a vastagságnak megfelelő RHA egyenértéket tudtak biztosítani. Az RHA egyenérték fogalma inkább a modern időkben vált széleskörűen használttá, amikor a kompozit és alternatív fém páncélzatok megjelenésével egységes rendszerben kellett kifejezni a védelem értékét.

Manapság kevésbé használt, de a második világháború második felében a hidegháború korai szakaszában nagyobb figyelmet kapott az öntött homogén páncél. A gyártási eljárása szerint nagyobb részeket egyben öntenek ki, majd a felesleget eltávolítva gyakorlatilag kész részeket

kapnak. Mivel nincs megmunkálva a öntvény, így az anyagszerkezete minősége nem éri el a hengereltnél tapasztalhatót. A külseje nincs edzve, így a keresztmetszetben tapasztalt keménységi eltérések öntvényhibának és nem megfelelő ötvözésnek tudható be, mint a ballisztikus ellenállóképességet javító eljárásnak. Az öntött páncélzat a leghatásosabb, ha az egész keresztmetszetében ugyanaz a keménysége, hiszen akkor nem jönnek létre a határokon olyan pontok, ahol fel tud gyűlni a feszültség. Ennek a hibának a kiküszöbölése érdekében hűtéskor az öntvény vastagabb részeit erős vízszugárral locsolják, ezért nem lesznek nagy hőmérséklet különbségek a változó vastagságok között. A kémiai összetétele megegyezik az RHA-val, azonban a minőség változó, hiszen az anyagvastagságot nehezebben lehet kontrolálni az öntvény esetében. Olyan tekintetben is hátrányban van az öntött páncél, hogy általában bonyolultabb a geometriája, mint a hengerelté és a korábban említett ok miatt a komplex geometriában könnyebben felgyülemlik a feszültség találat hatására. Ám ez a veszély nem csak a geometria, hanem az öntvény ridegsége okán is fennáll. Az Egyesült Államokban 1942 és 1943 között végzett tesztek alkalmával kiderült, hogy ugyanolyan vastag és ugyanolyan keménységi fokkal rendelkező lemez tekintetében a hengerelt felülmúlja az öntött vetélytársát. Mindkét vizsgált lemez 51 mm vastag volt, ám az öntött 15-20%-al gyengébbnek bizonyult a kísérletben használt 75 mm-es lövedékekkel szemben. A szovjet tankok esetében előszeretettel használták az öntvényből készült lövegtornyokat a JSZ széria és a T-54/55-ös modellek esetében. Az öntvények negatív tulajdonságai az utóbbiak esetében hamar bebizonyosodtak, amikor HESH (High Explosive Squash Head) lövedékekkel találkoztak harccselekmények közben.[5]

Nem kizárólag acélból gyártanak páncélozott járműveket, hanem egyéb fémeket is alapul vesznek. Ezek közül a leggyakoribb az alumínium és ötvözetei. Vegyük például az anyagot, amelyből a világ legtöbbet gyártott gyalogsági harcjárműve készült, a BMP-1/2 és ezek leszármazottja a BMP-3. A két felhasznált alumínium ötvözet jelölése az ABT-101 és az ABT-102, melyek összetételét és mechanikai tulajdonságait az orosz OSZT I 92014-90 szabványban írják le. Ezek alapján az ABT-101 és ABT-102 ötvözetekben az alumínium fő ötvözői cink és magnézium 5,4-6,2% és 2,4-3%-os aránnyal. Az ABT-101 160 HB Brinell keménységű, az ABT-102 10%-al lágyabb, amellet, hogy az ötvözetlen elemi alumínium 15 HB keménységgel rendelkezik. A nagy keménysége miatt az ABT-101 ellenállónak bizonyult a teszteken, azonban a ridegsége miatt könnyen váltak le repeszek a belső oldaláról, hiszen az alumínium ötvözetek körében igen rideg anyagot, ha kicsit keményebbre gyártják, akkor már üvegre hajazó tulajdonságai lesznek. Az ABT-102 a kísérletek alapján kevésbé hárítja el a találatokat, azonban

mivel lágyabb, a becsapódási energiát jobban képes eloszlatni ezzel állítva meg a lövedéket. A modern követelmények miatt az újabb BMP-3-asokon már nem az egyik vagy másik ABT típust, hanem a modernebb PASZ-1 páncélzatot használták. Ez lényegében a korábban említett két típus és ötvözetlen alumínium rétegzésével készül. Az ABT-101 a külső réteg nagy keménysége miatt, majd a középső az sima alumínium a repeszek felfogására, majd a legbelső az ABT-102 szintén a repeszek megfogása, illetve a becsapódási energia eloszlatása érdekében. Ez a konfiguráció a lőtéri próbák alkalmával 10-15%-al hatékonyabbnak bizonyult lőszer típustól függően, miközben a tömegnövekedés mindössze 7-10%-os volt. A heterogén páncélzat jól láthatóan növeli a védelmi szintet, azonban a gyártás komplexitását és költségeit is, illetve a meghajtásra és felfüggesztésre nehezedő teher is.[23]



[4.Kép] A PASZ-1 becsapódási próbák után

A hidegháború közepe felé a harci tapasztalatok és a páncéltörő fegyverek fejlődése miatt a harckocsi fejlesztők levonták a következtetést, hogy a homogén páncélzat többé már nem megfelelő. Az elavulást az hozta, hogy elterjedtek a kumulatív robbanófejes rakéták és az úgy nevezett HESH (High Explosive Squash Head – Nagy robbanóerejű, rogyókúpos repeszgránát) lőszer típusok a hadviselő felek körében. Ezek működési elve okán- melyet később tárgyalunk- szükségessé vált megtörni a homogén keresztmetszetét a páncélzatnak. Korai szovjet járműnél, a T-64 prototípusánál, az Objekt 432-nél alkalmazták először a kompozit páncélzatot, amely két rétegből állt. A külsején volt 80 mm hengerelt acél, a belső oldalon pedig 140 mm kompozit epoxy, ezek a függőlegeshez képest 60°-ban lettek döntve. Ez a kiosztás nem nyújtott magasabb védelmet hagyományos és űrméretalatti páncéltörő gránátokkal szemben, azonban a modernebb szárnystabilizált, robbanótöltetű, csúcsos páncéltörő gránátok becsapódási erejét és páncéltörő jellegű olvadt fémsugarát jobban nyelte el, mint a hengerelt lemez. Azonban, ez nem volt ideális kiosztás, mivel a lágyabb belső kompozit nagyban deformálódott a kinetikus

erőhatás nyomán, ezzel az első találat után közel nullára csökkentve a kompozit jótékony hatását. Az erre adott megoldás az lett, hogy a két rétegről háromra növelték a rétegek számát, egy 20 mm-es belső merevítést beiktatva, így megelőzve azt, hogy túlzottan deformálódjon a kompozit. Hazánk T-71M1-es harckocsijai is a fejlesztés egy iterációját kapták meg, mégpedig az úgynevezett 60-100-50 páncélzatot.[14] Ez annyit tesz, hogy kívülről van egy 60 mm-es vastagságú hengerelt lemez, majd összesen 100 mm vastag, egyenként 50 textolit réteg, majd belső merevítés gyanánt újabb 50 mm-es RHA. A textolit egy réteges kompozit, amelyet pamutszövetek melegsajtolásával állítanak elő. A szövetet hőre keményedő fenol-formaldehid gyanta alapú kötőanyaggal impregnálják. Mechanikai tulajdonságai alapján jó nyomószilárdságú és ütőszilárdságú a megmunkálásakor a fúrást és a vágást jól tűri. Több szempontból is hatékony a kumulatív löszerek ellen, mivel ezen kémiai löszertípusoknál nem a céltárgy sűrűsége a mérvadó. Ebből következik, hogy az ilyen kompozitok a fajlagosan jobb védelmet nyújtanak, mint az RHA, hiszen jóval alacsonyabb tömeg mellett képesek ugyanolyan ellenállásra. A T-72-es lövegtornyában is alkalmaznak kompozitokat. Alapjában véve öntött homogén alacsony széntartalmú acélból gyártják, melynek 270-290 BHN között mozog a keménysége. Ám az elülső oldalán a löveg két oldalán található egy-egy üreg az öntvényben, melyeket kvarc gömbökkal kvarc homokkal töltenek meg, amely, nem csak a változó szilárdságnak köszönhetően, hanem a kvarc kristály szerkezete okán is hatékonyan nyeli el a kémiai lövedékek találatait. Egyéb kompozit páncél alapanyagok az üveg, kerámiák, és az alumínium oxidok.[6]



[5. Kép] A T-72-es frontpáncélzata, kívül és belül acél, közepén textolit réteggel.

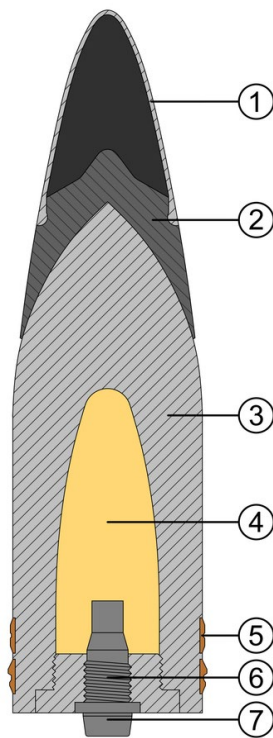
Lőszertípusok

A harckocsik és a páncélelhárító fegyverek története során számos típusváltozat terjedt el, ezek közül a legjellemzőbbeket fogjuk ismertetni. Először azonban fontos szólnunk néhány alapvető fogalomról, amelyek segítenek megérteni a célballisztikát. A páncélatütés azt jelenti, hogy a gránát elérte a harckocsi testét vagy lövegtornyát, majd annak a páncélzatát bizonyos mértékű deformáció mellett, de alapvetően egyben maradván leküzdötte, majd a harckocsi belsejében repeszek, légnyomás és hő formájában kárt tett. A részleges páncélatütés az akkor jelentkezik, amikor a gránát sikeresen célba ér és kontaktust létesít a harckocsi testével vagy lövegtornyával, viszont nem hatol át a páncélzat teljes keresztmetszetén, azonban annak belső oldalán perforációt és annak következtében repeszhatást idéz elő, amely kárt okozhat a légénységben és belső berendezésekben. A nem átütő találatokat három csoportra osztottuk. Az első csoport az, amikor a páncélt éri a találat, de az erőhatások következtében apró darabokra esik szét a lövedék. A második csoport az az, amikor eléri a talált a páncélt, de a beesési szöge, a páncélzat kialakítása és a mozgási energiája miatt a gránát „lepattan” a páncélzatról. Ennél a csoportnál

figyelhető meg a rosszul kialakított lövegtornyok esetében a lövedékcsapda jelenség. A harmadik csoport, amikor a lövedék vagy nem ért páncélzatot, vagy ha ért is irányt változtatott és valamilyen külső modulban vagy felszerelésben tett kárt, mint például a lánctalp, a lövegcső vagy optikai és kommunikációs felszerelések.[16]

Az első lövedéktípus, amelyet bemutatunk az nem is egy önálló típus, hiszen rengeteg módosított változatát fejlesztették ki, így ezeket egy kategóriában említjük. Ez pedig a páncéltörő lövedék. A legrégebbi és legegyszerűbb típus, egy aerodinamikus magas széntartalmú acélból és esztergálással készült. A páncélatütés a lövedék a kinetikus energiája leadásával valósul meg. Ha növekszik az átmérő vagy a csőtorkolati sebesség, akkor azzal együtt a páncélatütési képesség is, ennek megfelelően a paraméterek csökkentésével a páncélatütési képesség is követi azokat. A harckocsi belsejében ez rendszerint kisebb szögben szórja szét a repeszeket, kevesebb pusztítást végezve. A felületkeményített homogén páncéllemezek ellen fejlesztették ki a keményfémköpenyes páncéltörő löszert, amelynek a orrkúpját lecserélték a nagykeménységű acélról nagyobb sűrűségű anyagra, mint például a volfrám-karbid. A kemény hegy dolga, ha a keményített felületet áttörje, míg a lágyabb részeknek, hogy egyben tartsák a löszert és ne essen a becsapódás lökéshullámától szét kisebb darabokra, legalább is addig, amíg átüti a páncéllemezt. A ballisztikus köpennyel ellátott páncéltörő típust azért kellett kifejleszteni, mert a páncéltörő képességet javító és aerodinamikailag optimális geometria nem egyezik meg. A megoldás az lett, hogy a páncéltörő test orrkúpjára elhelyeztek a fejlesztőmérnökök egy könnyűfémből készült, aerodinamikailag optimális formájú köpenyt, amely segít megőrizni a gránát sebességét és ezzel együtt a mozgási energiáját. Emiatt mérhető volt a különbség a páncélatütési képességben, főleg nagyobb távolságok esetén volt jelentős a különbség. Az előbb említett két ötlet összeházasítására is akadt példa, ahol a lövedék teste lágyabb acélból, a köpenye nagy keménységű anyagból készült, és felkerült rá még egy ballisztikai köpeny is, ezzel megőrizve mindkét típus pozitív tulajdonságát, sőt, megsokszorozni azokat. Az utolsó altípusa a sima páncéltörő gránátoknak a robbanótöltettel szerelt. A robbanótöltettel szerelt gránátoknál a lövedék hátuljában egy üreg kapott helyet, melybe nemzetek és időszakok szerint különböző fajta robbanószerkeket töltöttek, a végére pedig egy gyutacsot, így kapva a talpgyújtós páncéltörő gránátot. Természetesen a robbanóanyag kisebb sűrűsége miatt elhanyagolható mértékben csökkent a mozgási energia és következésképpen az átütőerő is, azonban a célballisztikai nagyban javult. Átütéskor a gránát a harckocsi belsejében robbanva jóval nagyobb pusztítást végez, mint a robbanóanyag mentes változat, mivel szélesebb szögben szórja szét a nagyobb

menyiségű repeszeket és az általa kifejtett légnyomás is magasabb. Ebből a töltettel rendelkező típusból is készítettek ballisztikus és keményfém köpennyel szerelt változatot.[24]



[6.Kép] 1: ballisztikai köpeny, 2: keményfém orrkúp, 3: lövedéktest, 4: robbanótöltet, 7: fenékgyújtó

A korábban említett sebesség és tömegből számolt mozgási energiánál a képlet alapján, $E_m = \frac{1}{2} \times m \times v^2$ ahol a befolyásoló tényezők a tömeg fele és a sebesség négyzete. Ebből következik, hogy a tömeg kevésbé lényeges ebben az esetben, mint a sebesség. Erre alapozva a páncéltörő lövedék azonos kaliber mellett vastagabb páncélzatot képes átütni, ha a tömege csökken és a sebessége pedig nő. A keményfém-magvas páncéltörő lövedék használja ki az elvet kiválóan. A lövedék kialakítása henger alakú, azonban csak az orrkúpnál és a lövedék talpánál éri el a névleges kalibert, a lövedéktest középső része jóval kisebb átmérővel rendelkezik. A volfrám-karbid magra menettel csatlakozik a légellenállást csökkentő üreges könnyűfém kúp és a lövedéktest többi része. Nagyobb távolságokra nem kifejezetten hatásos a típus, hiszen kis tömege miatt hamar elveszíti a mozgási energiáját, illetve hegyes kialakítása miatt inkább a függőleges vagy alig döntött páncéllemezek ellen működik jól, hiszen könnyebben pattan le. A keményfém-magvas páncéltörő lövedék amiatt is nagyobb átütőerővel bír, hogy a lövedék kisebb felületen érintkezik a páncélzattal, ezért a négyzetmiliméterenként

leadott energiája magas. Kis méretéből és tömegéből adódóan átütés esetén kisebb kárt tud csak okozni a harcjármű belsejében.[14]

Az űrméret alatti tolólapos leváló köpenyes páncéltörő lövedéket a második világháború után fejlesztették ki, az első használója a brit 105 mm-es L7 típusjelzésű harckocsi löveg volt. A típus a keményfém-magvas páncéltörő lövedék alapötletét viszi tovább elhagyva a lövedéktest aton részeit, amelyek azért voltak szükségesek, hogy tűzkiváltás után a huzagolt lövegcsővel érintkezve megkapják a huzagolás nyomán biztosított forgási stabilitást. A leváló köpeny a megnevezésben arra utal, hogy van egy könnyűfémből vagy polimerből készült köpeny, ami arra szolgál, hogy a tűzkiváltás után érintkezzen a huzagolt vagy simafalú lövegcsővel, majd azt elhagyva leváljon a lövedékről ezzel csökkentve repülés közben a légellenállást, hiszen így csak a páncélatütés szempontjából lényeges lövedéktest éri ez a céltárgyat. A lövedéktest felépítése a ballisztikai köpenyből és a keményfémmagból áll. A mag leggyakrabban a korábban említett volfrám-karbidból, míg ritkább esetekben akár szegényített uránból is készülhet. Ezen löszertípus 30 mm-es géppágyúból kilőtt változatát szerepeltetjük a később tárgyalt szimulációink egyikében.[4]

A legmodernebb változata az űrméret alatti lövedékeknek az űrméret alatti vezetősárnyas tolólapos leválóköpenyes páncéltörő lövedék. Alapvetően nagyon hasonló az előzőleg említett lövedékhez, viszont fontos különbség, hogy a röppályáját nem a lövegcsőben kapott forgás, hanem a lövedék hátsó traktusában található stabilizátor szárnyak stabilizálják. A másik fontos különbség, hogy néhány kisebb kaliberű géppágyú és a most kivezetett brit 120 mm-es űrméretű L30A1 típusú harckocsiágyún kívül kizárólag sima, nem huzagolt lövegcsőveken lövik ki ezeket. Mivel nincs szüksége a huzagolásra, annak elhagyásával növekszik a kezdősebessége és a lőképe is. Fontos megjegyezni, hogy ez a típus kizárólag a kinetikus energiára hagyatkozik a páncélzat leküzdésekor, melyet nagyon magas, 1500 m/s, vagy annál magasabb kezdősebességével ér el. A kezdősebességnek köszönhetően lapos a röppályája, ennek köszönhetően szinte mindig merőlegesen érintkezik a céltárggyal. Jellemzően nagy keménységű acélból, volfrám-karbidból vagy akár szegényített uránból gyártják.[11]



[7. Kép] Az űrméret alatti vezetősárnyas tolólapos leválóköpenyes páncéltörő lövedék köpenyének leválása

A kumulatív páncéltörő gránát, vagy másnéven a robbanótöltetű, csúcsos páncéltörő gránát az előzőkkel ellentétben nem a mozgási energiájára támaszkodik a páncél átütésénél, hanem kémiai folyamatok lejátszódására. A gránát felépítése nagybán eltér az előzőkétől. A lövedéktest eleje egy egyenes kúp alakú üregből áll, amely kúpnak az alapja a lövedék eleje felé helyezkedik el, és a palástja rézből áll. a kúp mögött helyezkedik el a lövedéktest végéig a robbanótöltet. A robbanótöltet elműködésének hatására a réz palást egy olvadt fém sugarat hoz létre, amely hiperszonikus sebességgel közlekedik a páncéllemez felé. Ez a rézsugár és az átolvasztott, cseppfolyós páncélzat a küzdőtér belsejében jelentős károkat okoz. Mivel nem a mozgási energiájára hagyatkozik, ezért kiválóan alkalmazható gyalogsági páncélelhárító fegyvereknél, illetve lövegeknél nagy távolságú lövéseknél, hiszen 2 km-en ugyanannyi páncélt képes leküzdeni, mint 500 méteres távolságból. Hátránya viszont az, hogy kompozit anyagokkal, vagy előtét páncélzattal hatástalanítható. Huzagolt csőből kilőve veszít a páncélátütéséből, mert a centrifugális erők megakadályozzák, hogy tökéletesen egyenes sugarat formáljon. A megoldása a problémának a szárnystabilizált, robbanótöltetű, csúcsos páncéltörő gránát lett, mely sima csövű lövegekből lőhető ki és nem hosszanti tengely körül történő forgás, hanem a szárnyak aerodinamikai tulajdonságai stabilizálják a lövedéket, ezzel közel négyszeres páncél átütőerőt kölcsönözve neki. A lézeres távmérők segítségével az a probléma is megoldódott, hogy a kisebb csőtorkolati sebesség nehezebbé tette az irányzást.[5]



[8.Kép] Kumulatív lőszer a találat pillanatában

A repeszromboló gránát a hatását szintén nem a mozgási energiája, hanem a benne lévő robbanótöltet mértéke és a köpeny repeszeivel fejt ki. Az 1980-as évek előtt nem vették komolyan a repeszromboló gránátok fenyegetését a harckocsikkal szemben, mert az volt az általános vélekedés, hogy igaz, tud kárt okozni a lánctalpban és a külső komponensekben, de annál komolyabb kárt nem tud benne tenni. 1988-ban az amerikai hadsereg tesztelte ezt a fenyegetést szovjet tankokkal szemben 155 mm átmérőjű repeszgránátokkal. A kísérletek során bebizonyosodott, hogy a lövedékek mozgásképtelenné képesek tenni a harckocsit akár 30 méterre robbanva tőle, közeli robbanások jelentősen képesek leamortizálni a páncélzatot és közvetlen találat bizonyosan halálos a harckocsival szemben. Egybecsengett vele a vörös hadsereg tapasztalatai a második világháborúban a SZU-152-es önjárólöveg német harckocsik elleni bevetésével. A rideg páncéllemez egy ilyen repeszromboló találat nagy eséllyel törte ketté a robbanása által okozott lökéshullámokkal. A legénység számára komoly veszélyt jelent továbbá a robbanás során a harckocsin belül fellépő nagymértékű légnyomás növekmény, amely az emberi testre nagyon ártalmas. Egy kisebb találat esetén a páncéllemez belső oldaláról

leválhatnak repeszdarabok is. A következő és egyben az általunk említettek közül az utolsó típus ezt a jelenséget használja ki.[7]

A britek által kifejlesztett HESH (high-explosive squash head) löszertípus, mely magyar fordításban a nagy robbanó erejű rogyókúpos lövedék nevet kapta. A működését jól jelöli a megnevezése, mert amikor a céltárggyal kontaktust létesít a lövedék a vékony fém kúpja összerogy és a lövedék belsejében lévő plasztik robbanóanyag, a Hexotol szétnyomódik a páncélzat nagy felületén, majd késleltetéssel a fenékgyújtó berobbantja azt. A robbanás nem töri át a páncéllemezt hagyományos módon, azaz nem lesz egy nyitott üreg a páncélzat keresztmetszetében, hanem kihasználja a nagy keménységet a hengerelt lemezek esetében és az anyag ridegségét az öntött páncélzatnál. A robbanás lökéshulláma a rideg acélban nem tud tágulás és rugalmas anyagváltozás formájában eloszlani, hanem a belső oldalán megadja magát a felület és hangsebességnél gyorsabban haladó sűrű repeszrajt indít el, melynek a fő célpontja a légénység. Az első alkalom, amikor széleskörben használták az a Hatnapos háborúban volt az Izrael által használt brit eredetű Centurion harckocsikban. Az arab államok szovjet eredetű T-55-ös és T-62-es harckocsiéinak a tornya öntött acélból készült, amely a ridegsége nyomán különösen érzékeny volt a 105 mm-es HESH löszerek ellen. Számos harckocsit zsákmányolt az izraeli fél azzal, hogy a lövedéktípus alkalmazásával a harckocsiban nem tett különösebb kárt, azonban a légénységben igen. Ilyenkor kisebb felújítások után újra hadrafoghatóvá válik az így szerzett jármű. A későbbiekben gyengült a harcértéke a HESH-nek, mivel részben az alkalmazása miatt, részben pedig a kumulatív gránátok miatt széleskörben rendszeresítve lett a kompozit páncélzat. A kompozit változó sűrűsége miatt jobban elnyeli a robbanás erejét, melynek következtében csökken a lövedék hatékonysága.[14]



[9.Kép]: A HESH lövedék hatása a páncélzat belső oldalára

A probléma megoldása

Ebben a harckocsifejlesztési javaslatban, kutatásban a jármű belső védelmére szorítkozunk, mert ezt tartjuk a legfontosabb kérdésnek, illetve mert a világ modern harckocsijainak fejlődési iránya és ezt mutatja. A kutatásunk menete az abból áll, hogy azonosítjuk a tárgyalt típus küzdőterének olyan gyengébben védett területeit, amelyeket egy páncélzatkiegészítéssel hatékonyan lehet védeni és olyan fenyegetésekkel szemben is ellenállóvá tenni a harckocsit, amely ellen ezidáig nem volt az. A következő lépés a fejlesztési páncélcsoomagunkhoz használható anyagok kiválasztása, azok ismertetése. Ezt követően készítünk hozzá rajzokat és 3D modelleket, hogy terv szinten is létezzen, majd a megfelelő szimulációs programban az általunk kiválasztott löszertípus elleni védelmet szimuláljuk találat esetén. Mindezekből pedig végül levonjuk a megfelelő következtetéseket.

Használt eszközök

A kutatási program során használtunk mérőeszközök és informatikai háttér széles skáláját. Első lépésként a HM Currus Zrt. telephelyén mértük fel a dolgozatban tárgyalt harckocsi külső és belső méreteit, amely meghatározta a lehetőségeinket és a fejlesztés irányát. A felmérésnél

használtunk digitális fém tolómérőt és kis hatótávolságú lézeres távmérőt, hogy a pontos dimenzióit rögzíteni tudjuk a járműnek. A felhasználni kívánt anyagok megismeréséhez használtunk egy YXLON Cheetah EVO típusú roncsolásmentes anyagvizsgálathoz használt CT gépet, METLER TOLEDO AB204 típusú precíziós mérleget és tolómérőt is, de analóg kivitelben. A tervezési folyamat során a két legfontosabb program, amelyek biztosították az informatikai hátteret az az Autodesk által fejlesztett Autocad 2024 és az Ansys 2024R1 diáklicences változata, az utóbbin belül az Ansys Workbench with Speos 2024R1 és a Mechanical 2024R1 volt. Ezek közül az Autocad volt, amelyikben elkészültek a kétdimenziós rajzok, illetve a háromdimenziós modellek, az Ansys workbench volt, amelyikkel fel tudtuk paraméterezni az Explicit Dynamics típusú szimulációinkat, és végül pedig a Mechanical volt, amelyik kiszámolta és grafikusán megjelenítette az általunk készített szimulációkat.

Felmérés, fejlesztési irány megadása

Az általunk felmért T-72M1-es típusú harckocsi a felmérésünk idején szét volt szerelve főbb részekre, ennek megfelelően olyan részeit is meg tudtuk nézni, illetve mérni, amelyeket összeszerelt állapotban nem tudunk volna. Megtekintettük a leszerelt alkatrészek és berendezések közül az automata töltőrendszer lőszer rekeszét, a lőszerrekeszként is funkcionáló üzemanyagtartályt, a felfüggesztés egyes részeit, mint a futó és meghajtógörgők, a nagynyomású mosáson átesett motorblokkot és a külön lévő lövegtornyot kívülről és belülről. Ezen kívül jártunk a szinte teljesen lecsupaszított kocsitestben is. Ennek a során lettünk figyelmesek a harckocsi belső acél páncélzatára szerelt úgy nevezett Podboj rétegekre, amelyek első rendűen ABV védelmi, másodrendben repesz elleni védelmi feladatot lát el. A Podbojjal az a probléma, hogy nincsen mögötte merevítés, így szabadon deformálódik ütés hatására, ezen kívül, hogy hőre lágyul. A fejlesztésünk iránya így azzá vált, hogy az oldalpáncél és a forgó lőszerrekesz kiegészítő páncélzatát lecseréljük egy modernebb és hatékonyabb megoldásra. Az ok, ami miatt ezekre a területekre szorítkozunk, hogy a kocsitesten ahol vékonyabb a páncélzat nem tenne sok különbséget, csak felesleges plusz tömeget jelentene. A toronyban pedig meglátásunk szerint nincs sok értelme a repesz elleni páncélzatnak, mert ha egy átütő találat éri, akkor a szűk küzdőtér miatt mindenképpen végzetes következményekkel járna. További igazolásként hozzuk fel az érvet, hogy az Öböl-háborúban résztvevő T-72-eseket ért találatok az esetek több mint 50%-ban oldalról érkeztek.[10] Első lépésként mindenképpen kivezetnénk a használatát az összes olyan lőszerrekesznek, amely nem a forgó, motorizált a torony alatt elhelyezkedő, mivel azokat robbanásveszélyesnek értékeljük. A szóban forgó kiegészítő

lőszerrekeszeket nem tudja védeni a páncélzat és harci körülmények között szinte elérhetetlenek a legénység számára az így is szűkös küzdőtérben.[18]



[10.Kép] A Podboj réteg felszerelt állapotban a felfogató pontjai leszerelés után

A páncélzat kialakításához az anyagok kiválasztása. Kísérleti anyagok

Kialakítás szinten mindenképpen több rétegű kompozitban gondolkodtunk. A küzdőtér szűkös kialakítása miatt nem tudtuk sokkal meghaladni a meglévő Podboj réteg 25 mm-es vastagságát, maximum 30 mm-re tudtuk ezt növelni. Mivel a hatékony belső páncélrétegek minimum vastagsága 10 mm, így az a döntés született, hogy 3 darab 10 mm vastagágú réteggel tervezzünk. Ezek rétegrendje követi a kompozit páncélzatok hagyományos elvét. A külső réteg nagy keménységű, amely találat esetén eséllyel szakítja szét a lövedéket, de minimum kihívást jelent annak átjutni rajta. A második egy olyan réteg, amely jó energiaeinyelő és jó a rugalmas alakváltozása, magas folyáshatárral rendelkezik. A harmadik, egyben utolsó réteg feladata, hogy ne engedje a belső kettőt túlzottan deformálódni, ezért a fő feladata a merevítés. A külső rétegre kerámiát terveztünk, és amikor páncélzatnál alkalmazható kerámiák után kutattunk egy kitűnt a többi közül. A bór-karbid erre a feladatra kiváló anyag, hiszen a harmadik legkeményebb anyag a bór-nitrid és a gyémánt után, amellet, hogy a sűrűsége viszonylag alacsony $2500 \frac{kg}{m^3}$, ezáltal megfelelő védelmet nyújtva alacsony tömeg mellett. Az olvadáspontja igen magas, 2350 °C, Vickers-keménysége 38 GPa. Nagy a rugalmassági határa, de kicsi az alakváltozó képessége. A kinetikusbehatások elleni védelem mellett képes átvenni a sugárzás elleni feladatokat is a neutron elnyelő képessége miatt. A kerámiák úgy működnek páncélzatként, hogy amikor a külső acélfelületet találat éri, azon végigfutó lökeshullám porrá zúzza a kerámiát ezzel növelve a térfogatát, a por éles és kemény kerámiaszilánkokból fog állni, melyek a lövedéket áthaladáskor „ledarálják” (ridegen szétrobban a kerámia).

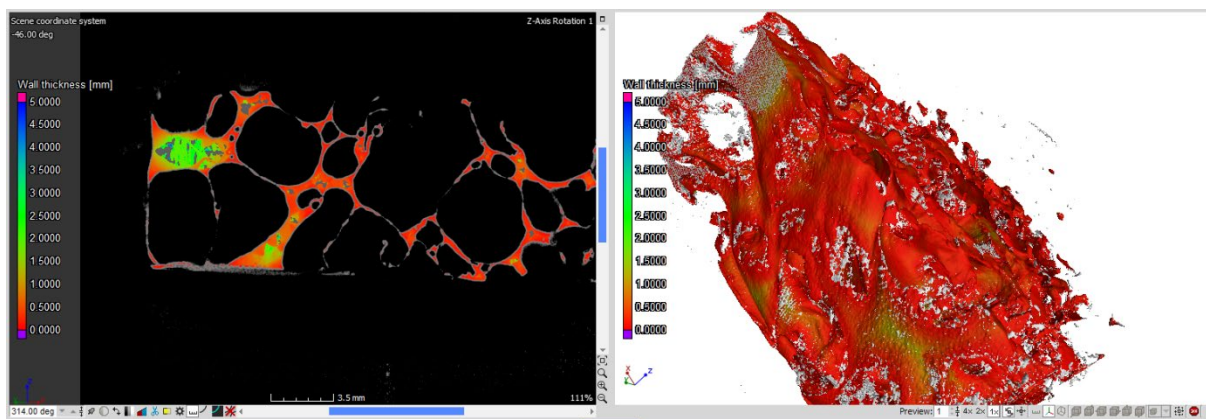
A középső nyomás és ütéselnyelő réteghez egy igen érdekes anyagot találtunk, a habosított alumíniumot. A habosított alumíniumot úgy állítják elő, hogy a folyékony fémbe lehűlés közben semleges gázt fecskendeznek, amely körül buborékként megszilárdul az anyag. Az egységnyi habosított alumíniumnak alacsonyabb a sűrűsége, mint a tömörnek.[20]



[11.Kép] Habosított alumínium.

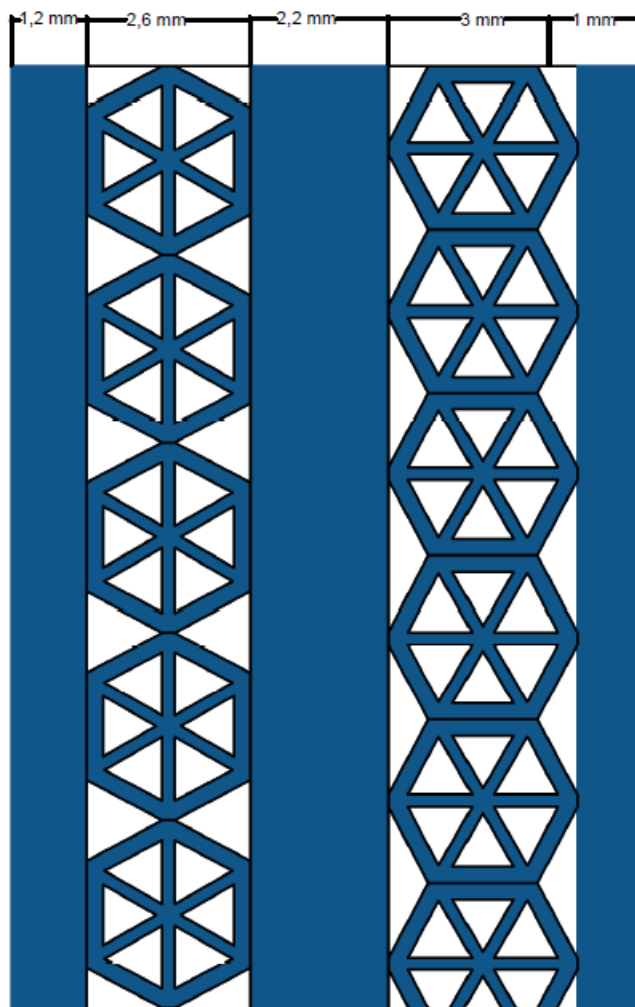
Az általunk mért próba darab méretei a következők voltak: $25,6 \text{ mm} \times 26,5 \text{ mm} \times 6,8 \text{ mm}$, tömege pedig $1,9979 \text{ g}$ volt. Ezek alapján kiszámoltuk, hogy a sűrűsége $433,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, amely a tömör alumínium $2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ -ének a 16,04%-a. A nyomó szilárdsága magasabb, mint a tömör alumíniumé, közel négyszerese. Készítettünk a próba darabról egy CT felvételt, amelyből a feldolgozó szoftvernek köszönhetően háromdimenziós modell lett. A modell segítségével darab keresztmetszetén megfigyelhető volt, hogy a cellák falvastagsága hogyan alakul. A jellemző a 0,5 és az 1 mm közötti értékek voltak, amely helyenként viszont elérte a 3 és a 3,5 mm közötti vastagságot is. Mivel nincs olyan egyértelmű tengely, melynek mentén vékonyabbak lennének a falak, mint a többin, így kijelenthető, hogy egyenlő oldalhosszúságú test esetén annak

ellenére, hogy a buborékképződés véletlenszerű, nem függ az erőhatás vektorától az anyag szilárdsága.



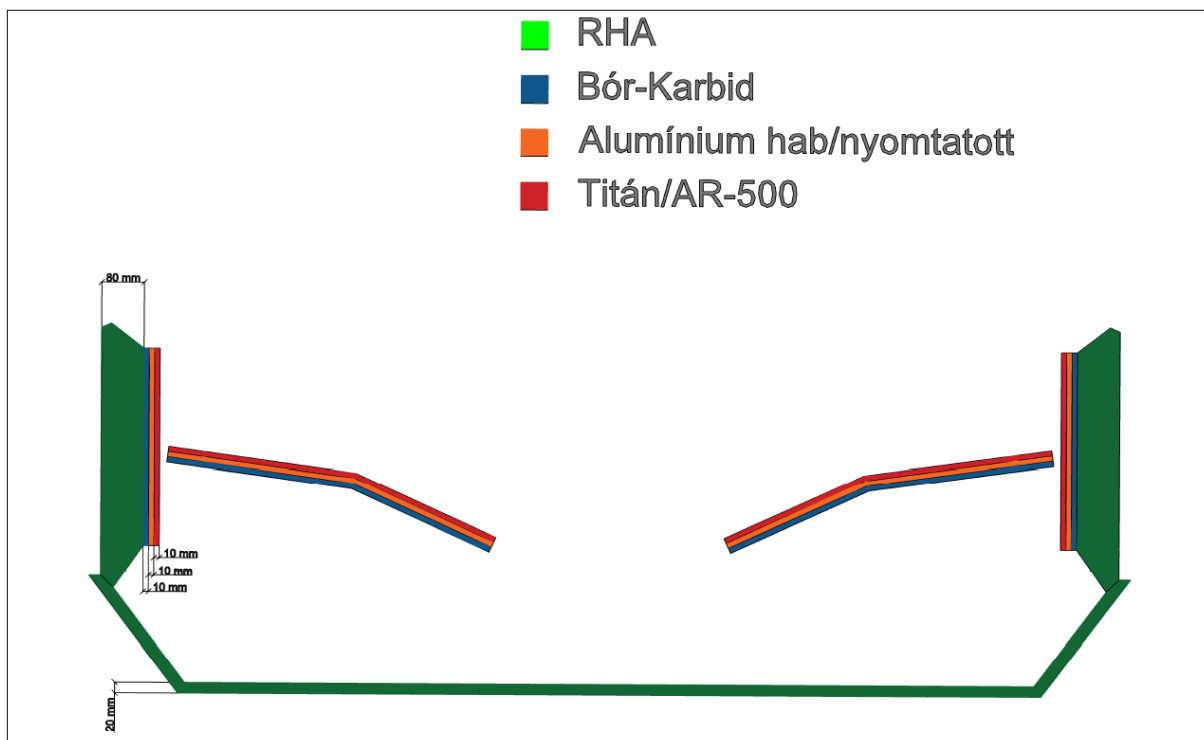
[12.Kép] A CT által készített felvételen a próbatest keresztmetszete

A habosított alumínium alternatívája lehet a fém háromdimenziós nyomtatóval készített alumínium páncéllemez. Itt ellenőrizhető a cellák szerkezete, és ezt kihasználva lehet erősíteni az anyagot oly módon, hogy egy előre meghatározott irányú erővel szemben legyen ellenállóbb. Ezt kihasználva terveztünk olyan cellaszerkezetet, amely két külső merevítőlapból, két belső háromszögekre osztott hatszögletű sejtekre és az ezt elválasztó további lapra. A két sejtsor egymáshoz képest 90°-al elforgatott hatszögekből áll. A nyomtatást semleges atmoszférában kell végezni, hogy a cellákba szorult gázok ne legyenek tűzveszélyesek.



[13.Kép] A 3D nyomtatott alumínium metszeti rajza

A harckocsi küzdőterével közvetlen érintkező rétegnek olyan fémre szántunk, amely könnyű és rugalmas. Az első választásunk a titán volt, amely kisebb sűrűségű a maga $4506 \frac{kg}{m^3}$ -ével, mint az acél $7850 \frac{kg}{m^3}$ -e, viszont közel annyi páncélvédeltséget nyújt. Fontos szempont azonban, hogy igen költséges az előállítása és nagy felületen 10 mm-es vastagságban előállítani az általa nyújtott védelemhez képest aránytalanul magas, és éppen ezért megfelelő alternatívának tartjuk az AR500-as megfelelőségű acéllemezt. Az amerikai MIL-A 46177 szabvány szerint a Brinell keménysége 477-534 HBW10/3000-W között van. Ez a mérési eljárás a szabványos Brinell-keménység mérés, csak a mérés során 10 mm átmérőjű volfrám golyót nyomnak az anyagba 3000 kilogrammsúly, azaz 29419,95 N erővel. A széntartalma 0,27-0,3% alakul, főbb ötvözői a mangán, a króm, a molibdén és a nikkel, melyen 0,95%-ban, 0,75%-ban, 0,65%-ban és 0,35%-ban vannak jelen az anyagban. Nagyobb keménysége és azonos tömege miatt érdemesebb az RHA helyett használni.[22]

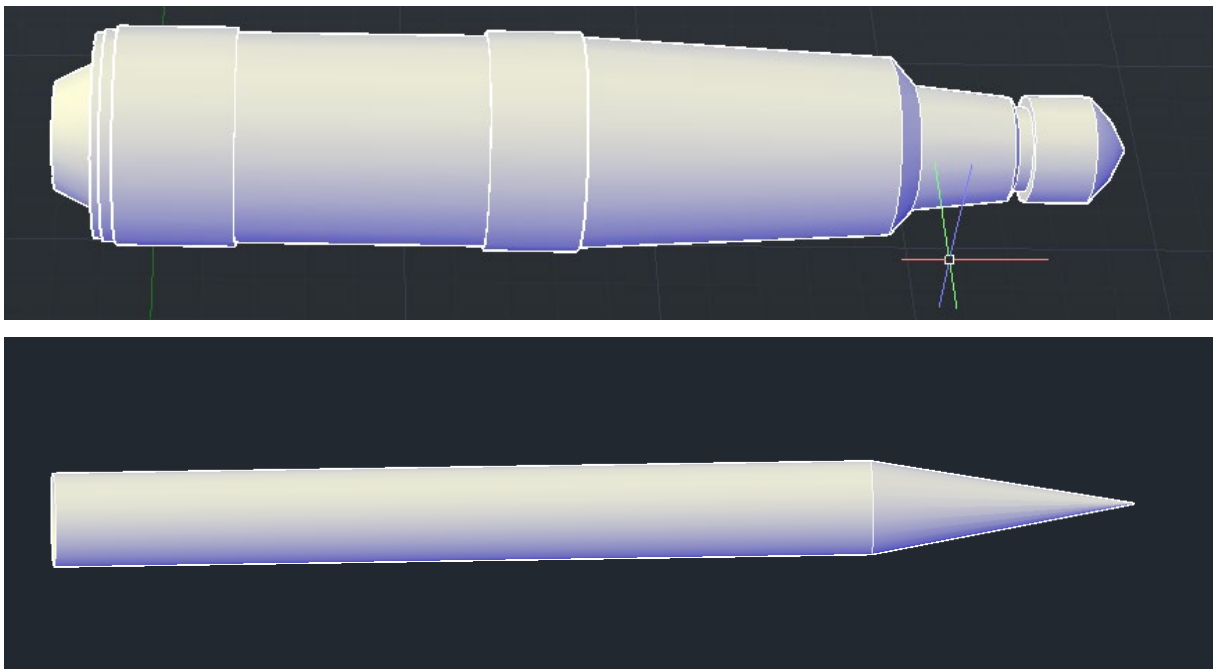


[14.Kép] A kiegészítő páncélzat metszeti rajza

A kiegészítő, vagy repeszpáncél felszerelését úgy tervezzük, hogy a már meglévő meneteit a Podboj rétegeknek hasznosítanánk és 250×250 mm-es „csempékben” szerelnénk fel a belső páncélzatra és a csempék között hagynánk 1 mm helyet, hogy a benne levő fémek képesek legyenek tágulni oldal irányban, ezzel növelve azt a feszültséget, amely a lemezt érve rugalmasan eloszlik. A másik ok, ami indokolja a kisméretű csempék alkalmazását, hogy a találatot kapott porrá szétrobbant kerámiát könnyebb cserélni ilyen méretben, minthogy az egész lövegtornyot el kelljen távolítani a belső berendezésekkel egyetemben. Ezeket a háromrétegű csempéket csavarral rögzítenénk, amelyeket ellátnánk önzáró alátéttel, hogy nehezen lehessen oldani a csavarokat. A kiegészítő páncélzat tömege oldalanként 103,63 kg. Ezt a számot úgy kaptuk, hogy a három anyag sűrűségével felszorzottuk a rétegek térfogatát, amelyből az az eredmény született, hogy 6,02 kg habosított alumínium, 35,01 kg bór-karbid és 62,61 kg titán szükséges. Alternatív megoldás esetén 45,73 kg tömegnövekményt jelente, ha nem titánnal, hanem AR500-as lemezzel dolgoznánk. A forgó lőszertároló lemezpáncélzatát is lecserélnénk ugyanezzel a rétegrenddel, amely tömege összesen 149,71 kg. Ez 8,69 kg habosított alumíniumot, 50,58 kg bór-karbidot és 90,44 kg titánt jelentene. Ehhez képest, ha AR500-as lemezzel számolunk, akkor 66,02 kg-al lesz nehezebb ez a páncélzat. A forgó lőszertároló tengelyére lenne ez felszerelve, ahogy a lekerülő páncélzat is megtartva a csapóajtót, amin a töltet és a lövedék átemelése történik.[19]

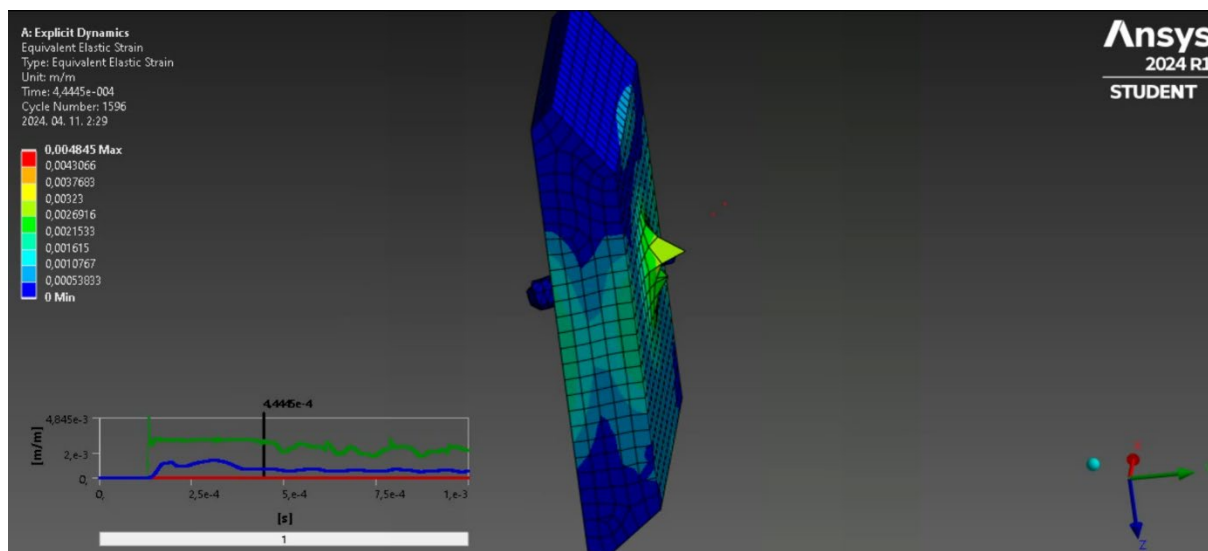
Szimulációk

A páncélzat ötletünket szimulációval teszteltük. Ezekben a szimulációkban azt vizsgáltuk, hogy páncélátütő találat hatására hogyan viselkedik a páncélzat jelenlegi konfigurációban és ugyanaz a löszertípus azonos paraméterű találatára az általunk javasolt. A szimulációkat az Ansys 2024R1 tanulói licenccel készítettük, melynek a Workbench programjában paramétereztük fel, a Mechanicalban pedig számoltattuk ki és vizualizáltuk az eredményeket. A szimulációs környezet az úgy nevezett Explicit Dynamics, azaz lineáris dinamikai rendszer. Összesen öt szimulációt futtatunk le, amelyeknél az összes alakváltozást, az összes sebességváltozást, az összes alakváltozást, azon belül a rugalmast és a képlékenyt, és végül a feszültség hatásokat.[21]



[15.Kép] A szimulációhoz használt löszertípusok háromdimenziós modelljei

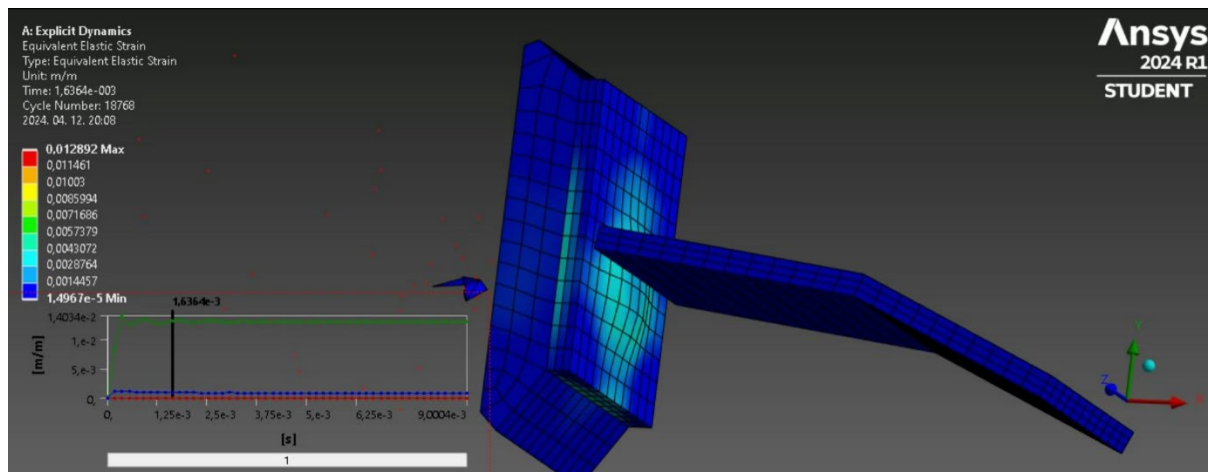
Az elsőben azt vizsgáltuk, hogy a jelenlegi 80 mm vastag hengerelt acél páncélzat hogyan viselkedik egy 500 méterről leadott találatnál. Az ennél használt lövedék a 30 mm-es űrméret alatti 3UBR8 típusú volfrám-karbid lövedék. A lövedék háromdimenziós modelljénél csak a volfrám-karbid magot használtuk, mert a ballisztikus köpenye nem befolyásoló tényező találatkor. Elsőként ennél a kontroll szimulációnál a lövedéket, mint szilárd testet, a céltárgyat, mint képlékeny testet kezeltük. A szimuláció lefutása után meg tudtuk határozni a páncélzat azon pontját, ahol először okoz a lövedék szakadást az anyagfolytonosságban.



[16.Kép] A 3UBR8 találatának szimulációja a páncélzat törése pillanatában

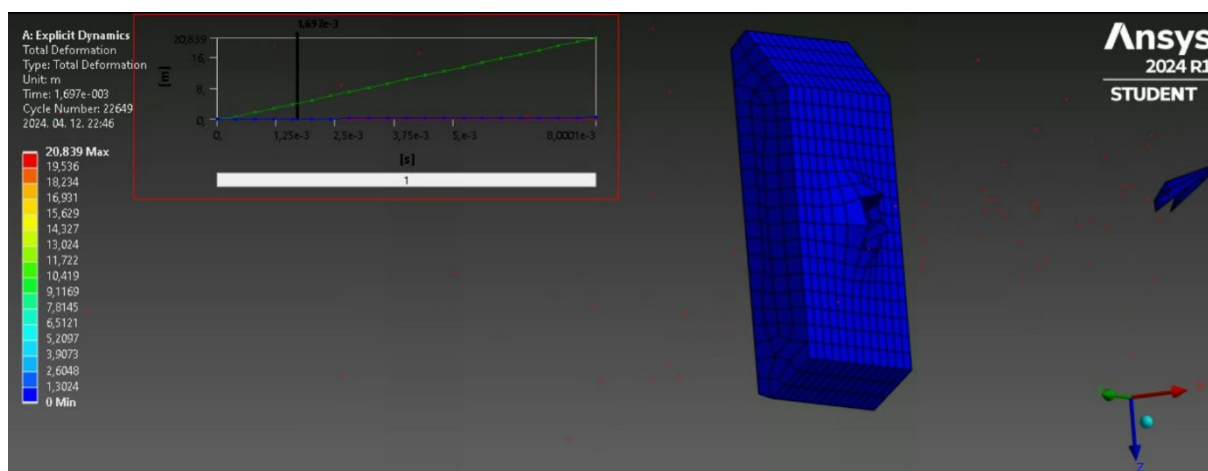
Ezen kívül az is kiderült, hogy ez a lövedék a 300 g-os tömegével és az 1050m/s-os becsapódási sebességével csak perforálni tudja a páncélt, azaz részleges átütést elérni, amely a belső oldalon repeszhatással jár.

A második szimuláció során megvizsgáltuk, hogy a 3UBR8 ugyanazokkal a paraméterekkel, mint az előzőnél milyen hatással van ugyanarra a lemezre, de ezúttal a páncélzatkiegészítéssel. Itt nem csak az oldalpáncélra kerülő rétegeket szerepeltettük, hanem a forgó lőszertároló tetejére menőket is. Ennél a szimulációnál már képlékeny testként kezeltük a lövedéket is, nem csak a páncélzatot. Az eredmény az lett, hogy a lövedék áthatolt a meglévő külső 80 mm-es lemezen, de a belső kiegészítő páncélzat már megállította azt. A bór-karbid réteg et is átütötte, azonban a folyamat során a lövedék nagy része leforgácsolódott és a habosított alumínium és a legbelső titán/AR500-as réteg annyira rugalmas volt, azokról visszapattant a lövedék megmaradó része és ellenkező irányban haladt tovább. A küzdőtér oldalán jelentős, de nem végzetes horpadásként jelentkezett a becsapódás az összes résztvevő anyag átlépte a folyáshatárát, így megmaradt a kitüremkedés. Fontos aspektus, melyre korábban nem gondoltunk, hogy a forgó lőszerrekesz és az oldalpáncél között olyan kicsi a rés, hogy a lőszerrekeszt fedő páncélzat mintegy merevítés viselkedett, és ellentartott a találatnak ezzel csökkentve a horpadás mértékét elnyelve a találat energiájának egy részét. A rekesz páncélzatában kizárólag rugalmas alakváltozás ment végbe, a folyamat után visszanyerve eredeti alakját. A találat során keletkező repeszek az előzővel ellentétben nem a küzdőtér, hanem a külvilág irányába távoztak, amely azt jelenti, hogy az előzővel ellentétben semmilyen kár nem keletkezett a harckocsi belsejében.

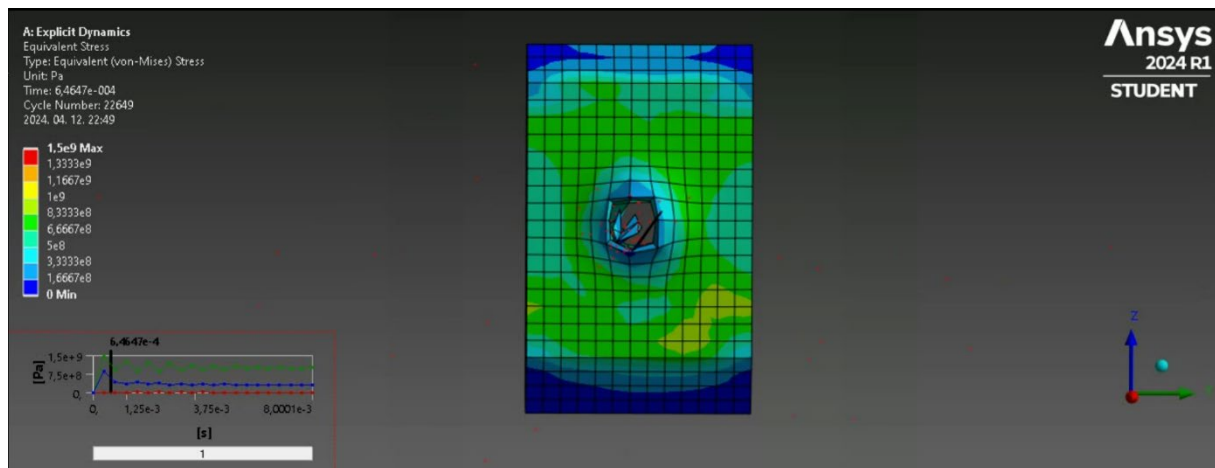


[17.Kép] A 3UBR8 találata, piros pontként láthatóak a repeszek a páncélzaton kívül a deformálódott lövedékkel.

A harmadik szimulációban egy űrméret alatti leválóköpenyes szárnystabilizált lövedék becsapódását szimuláltuk a kontroll, azaz a jelenlegi páncélzaton. A lövedék típusa a 3VBM-17 „Mango”. Ez nem a legmodernebb típus, de így is igencsak elterjedt. A lövedéktest edzett acél, a lövedékkör köpenye volfrám a szimulációban csak ezeket a komponenseket vettük figyelembe. A csőtorkolati sebessége 1700 m/s, a lövést a szimulációban 2 km-ről adták le, amely bőven benne van a hatásos lőtávolságában. A lövedék tömege 4850 g, a beesési szöge 90°, ez a lövedék számára az ideális és ennek köszönhetően a páncélzatnak a legnehezebb feladata van. A szimuláció lefuttatásakor a várt eredmény keletkezett, könnyűszerrel átütötte a páncélzatot a lövedék, amely közben deformálódott és nagy mennyiségű gyors repeszt szórt a küzdőtérbe azzal együtt, hogy maga a lövedék is bejutott oda.

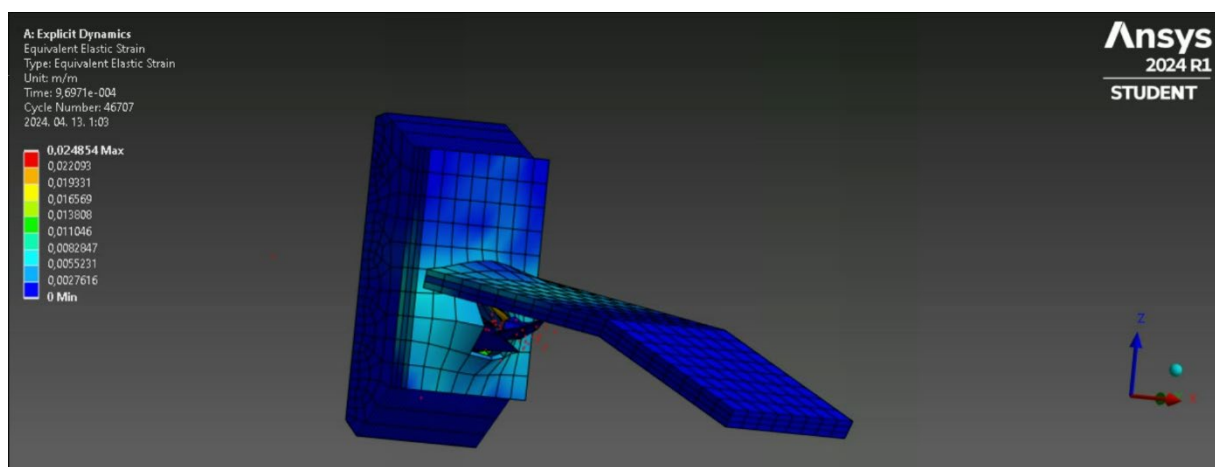


[18.Kép] A 3VBM-17 átütése a képlékenyen deformálódott páncéllemezzel és lövedékkel, piros ponttal pedig a repeszek láthatóak

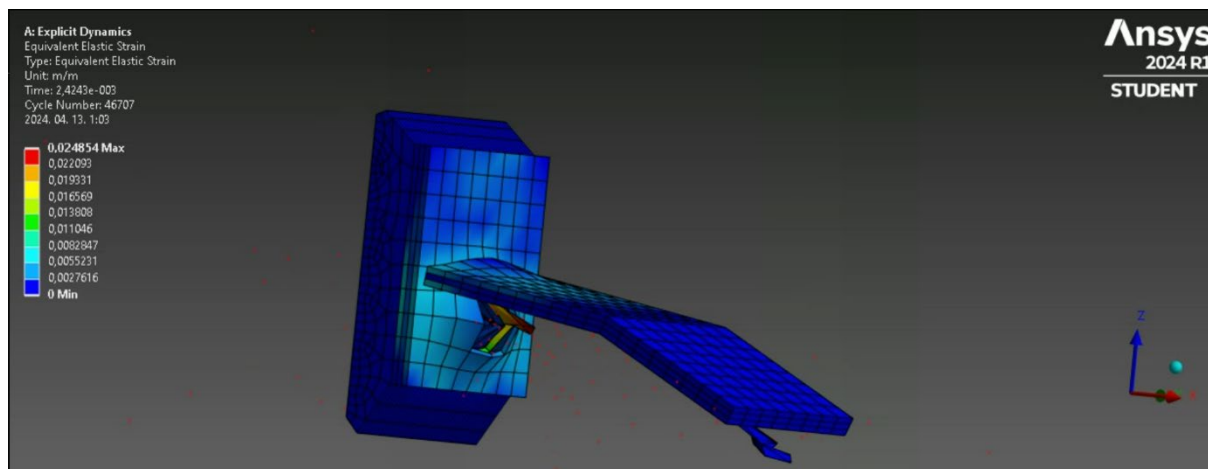


[19.Kép] A 3VBM-17 átütése a képlékenyen deformálódott páncéllemezzel és lövedékkel, piros ponttal pedig a repeszek láthatóak

A negyedik szimulációban ugyanazzal a kezdőfeltételekkel dolgoztunk, mint a hármas számúban azzal az eltéréssel, hogy nem a meglévő, hanem az általunk összeállított kompozit páncéllemezekkel kiegészített verzió volt a céltárgy. Ebben az esetben a lövedék szintén sikeresen áthatolt az oldalpáncélon és a rajta levő plusz rétegeken, viszont olyan szinten deformálta és lassította le a haladását a találatkori 1450 m/s-ról 500 m/s-ra, hogy a lőszerrekesz páncélzatát már nem tudta átütni és arról a kialakításából adódóan lefelé, a jármű alváza felé haladt tovább. A forgó lőszerrekesz páncélzata itt is merevítésként szolgált, viszont a nagyobb erejű találattól képlékeny alakváltozás ment végbe azon a részén, ahol érintkezett a deformálódott oldalpáncéllal és ahol eltalálta a lelassult lövedék. Ez az eredmény azt mutatja, hogy a lőszerrekeszre helyezett kiegészítő páncélzat sikeresen megvédte a lövegtorony legénységét nem csak a halálos repeszektől, hanem a velük együtt közlekedő lövedéktől is.

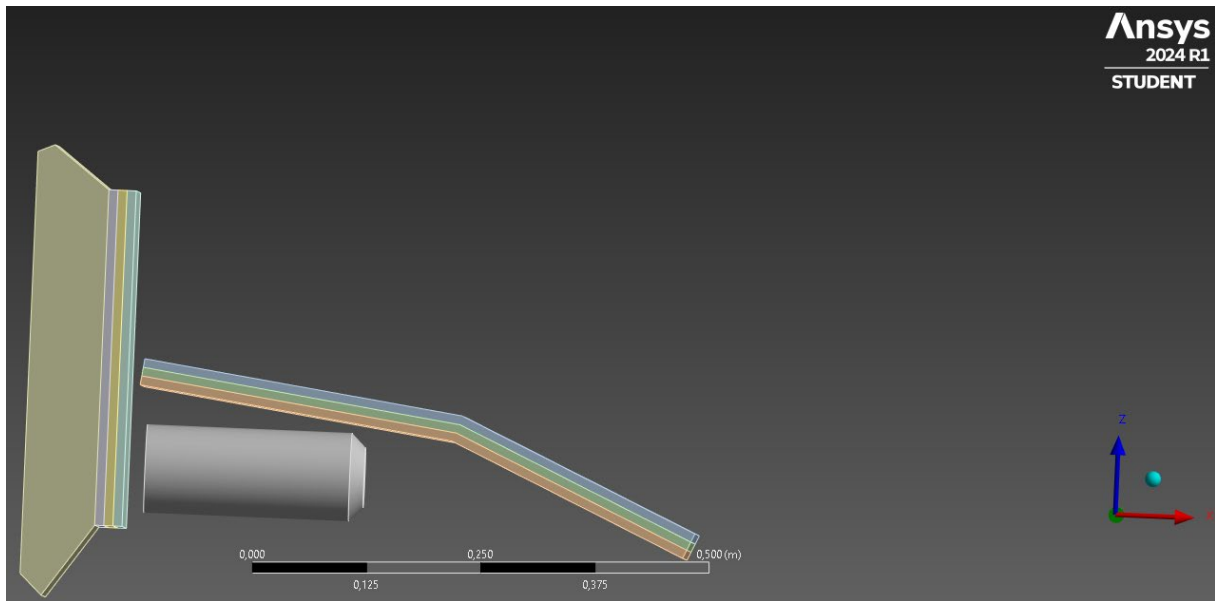


[20.Kép] A 3VBM-17 átütése a kiegészítő páncélzaton, a repeszek iránya megfigyelhető a páncélzat alakváltozásával



[21.Kép] A 3VBM-17 folytatja az útját az alváz irányába, a piros pontokkal jelölt repeszek a küzdőtér alatt maradnak

Az ötödik szimulációban azt akartuk lemodellezni, ha találat vagy tűz hatására a harckocsi lőszeréből egy töltet berobban a lőszerrekesz páncélzata alatt. Itt arra voltunk kíváncsiak, hogy milyen repeszhatással, légnyomásváltozással és a páncélzatban alakváltozással jár az esemény. Itt ütköztünk olyan falba, amely a jelenlegi körülmények között áthatolhatatlannak bizonyultak. Az Ansys diák licence csak egy bizonyos számú részecskét és térelemet képes kezelni és a rendelkezésre álló hardver erőforrás felét használja fel. Ennek köszönhetően nem lehetett lefuttatni ezt a szimulációt és az előzőek esetében sem tudta olyan részletességgel szimulálni az eseményeket, mint ahogy azt szeretnénk volna.



[22.Kép] A töltet robbanásának szimulációja a kezdő állapotban

Eredmények értékelése, további fejlődési irány

A szimulációk megmutatták, hogy a háromrétegű kiegészítő repesz páncélzat a vizsgált rétegrenddel és vastagságokkal képes javítani a tárgyalt részek páncélvédetségét. Mindkét szimulációban, amely sikeresen lefutott és működés közben mutatta a páncélzatot azt láthattuk, hogy az általunk meghatározott feladatát, amely a repeszek elleni védelem betöltötte, sőt, az első esetben meg is akadályozta a perforációt, a másodikban pedig eltérítette a lövedék olyan irányban, hogy az ne jelentsen további veszélyt. Ez nem csak annak tudható be, hogy alkalmasak a tárgyalt anyagok a feladat betöltésére, hanem igazolást nyer az a koncepció is, mely a döntött páncéllemezek hatékonyságát írja le.

Olyan lehetőséget látunk ebben az elképzelésben, hogy tovább szeretnénk vinni a kísérleteket és nem csak kinetikus lövedékekkel végeznénk szimulációt, de repeszromboló és kumulatív típusokkal is. A szimulációkat úgy is lehetne fejleszteni, hogy több részre osztott felületekkel dolgozunk. Ezek előfeltétele egy jobb programlicenc és serveren végzett szimuláció számítás. Ha további virtuális kísérletek erősítik az itt leírt bizonyításokat, akkor akár elkészítve a páncélzatot éles lövészet során is ki lehetne próbálni a hatékonyságát. Amennyiben ezek a próbák jól sikerülnek, akkor létre tudunk hozni egy nem csak T-72-esek számára készült, hanem univerzális repesz elleni páncélzatot. Ezek teljesülésekor kijelenthetjük majd, hogy valóban sikerült a légénységvédelmet fejleszteni modern eljárásokkal.

Irodalomjegyzék

- 1: Headquarters, US Army Materiel Command, "Elements of Armament Engineering Part Two Ballistics, Cp. 10, p. 4", n.d, 1963
- 2: W.N.M. Jamil, A. M. Azlan, Z. Sajuri, S. Abdullah, M.Z. Omar, F. Abdullah, és W. F. H. W. Zamri, "Mechanical properties and microstructures of steel panels for laminated composites in armoured vehicles," International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, vol. 13, no. 3, pp. 3741-3753, December 2016, DOI: 10.15282/ijame.13.3.2016.16.0306.
- 3: MN HTI, "T-72 harckocsi századparancsnoki változata sorozatgyártási dokumentációja HTJ.TU.1980," levéltári forrás, HM Currus Zrt levéltár, 1981.02.01
- 4: R. M. Ogorkiewicz, "Technology of Tanks," Jane, vol. 1-3.
- 5: Y. C. H. Kelvin, "The Impact of Armor on the Design, Utilization and Survivability of Ground Vehicles: The History of Armor Development and Use," n.d.
- 6: P. J. Cooney, "Armor, The Professional Development Bulletin of the Armor Branch PB 17-88-1," January-February 1988.
- 7: G. A. Durham, "Who Says Dumb Artillery Rounds Can't Kill Armor," Fort Sill, OK: US Field Artillery Association, 2002, 4 p.
- 8: J. M. Warford, "The First Look at Soviet Special Armor," in Journal of Military Ordnance, vol. 12, no. 3, May 2002.
- 9: "MIL-A-12560H(MR), Military Specification: Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous (For Use in Combat-Vehicles and for Ammunition Testing)," Department of Defense, USA, 2009.
- 10: M. Held, "Warhead Hit Distribution on Main Battle Tanks in the Gulf War," Argos Press, 2000. Letöltve: <https://www.argospress.com/articles/2000/warhead-hit-distribution-on-main-battle-tanks-in-the-gulf-war>. (letöltve: 2024.04.01)

- 11: "Korszerű harckocsik és harcjárművek – Oldal 22," Netkönyvek.hu, Letöltve: <https://netkonyvek.hu/korszeru-harckocsik-es-harcjarmuvek/22/>, (2022.12.25.2023.01.02.)
- 12: S. J. Zaloga, "M1 Abrams vs T-72 Ural," [Book Title or Publisher Missing], [Publication Year Missing].
- 13: [Author Unknown], "The Soviet T-72 Tank - Performance," declassified CIA document, [Date of Declassification or Original Date of Document Missing].
- 14: [Author Unknown], "U.S. Intelligence and Soviet Armor," declassified CIA document, [Date of Declassification or Original Date of Document Missing].
- 15: S. J. Zaloga, "T-72 Main Battle Tank 1974 - 1993," [Book Title or Publisher Missing], [Publication Year Missing].
- 16: R. Hilmes, "Kampfpanzer Heute und Morgen," [Publisher Missing], [Publication Year Missing].
- 17: [Author Unknown], "Soviet Tank Programs," declassified CIA document, [Date of Declassification or Original Date of Document Missing].
- 18: "T-72 dokumentáció," HM 51 csoport, MN HTI, hozzáférés: HM Currus Irattár, [Kiadás éve hiányzik].
- 19: "Technikai útmutató a T-72 harckocsi nagyjavításához, fődarabok, részegységek összeszerelése és ellenőrző vizsgálata," Technológiai osztály, HM Currus, [Kiadás éve és további kiadási információk hiányoznak], hozzáférés: HM Currus Irattár.
- 20: E. Koza, M. Leonowicz, S. Wojciechowski és F. Simancik, "Alumínium habok nyomószilárdsága," in Materials Science and Engineering A, köt. 341, sz. 1-2, o. 35-40, 2003. június. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509303003503>. (Hozzáférés dátuma: 2024.03.10)

21: H. Blumenauer és G. Pusch, Műszaki törésmechanika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987. ISBN: 963-10-6718-1.

22: "MIL-A-46177, Military Specification: Armor, Steel Plate and Sheet, Wrought, Homogeneous (1/8 to Less Than 1/4 Inch Thick)," Department of Defense, USA, [Kiadás éve hiányzik].

23: "OSZT I 92014-90, Technical Specifications for Industrial Products," [Kiadó hiányzik], 1990.

24: C. Ankerstjerne, "Anti-tank Ammunition Types," Panzerworld, [Kiadás éve hiányzik], elérhető: <https://panzerworld.com/anti-tank-ammunition-types> (Letöltve: 2024.02.14)

Ábrajegyzék

[1.Kép]: Panther harckocsi, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Panzerkampfwagen_V_A_2.jpg

[2.Kép]: 45mm-es acéllemez effektív értéke függőlegesen, Saját gyártású kép

[3.Kép]: Az RHA és az AR500 szövetszerkezete, https://www.researchgate.net/publication/317023642_Mechanical_properties_and_microstructures_of_steel_panels_for_laminated_composites_in_armoured_vehicles

[4.Kép]: A PASZ-1 becsapódási próbák után, <https://eng.niistali.ru/scientific-developments/armor-materials/armored-aluminum-alloys/>

[5.Kép]: A T-72-es frontpáncélzata, <https://imgur.com/SptaeB2>

[6.Kép]: APCBCHET lőszer, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Armor-piercing_capped_ballistic-capped_high-explosive_tracer_example.png

[7.Kép]: APFSDS lőszer, https://salepeaket.live/product_details/15324780.html

[8.Kép]: Kumulatív lőszer hatása, <https://militaryleak.com/2023/11/08/taiwan-orders-10000-kestrel-anti-armor-guided-weapons-for-conscript-army/>

[9.Kép]: HESH lőszer hatása, https://en.wikipedia.org/wiki/High-explosive_squash_head#/media/File:HESH_round_spall_damage.png

[10.Kép]: A Podboj réteg felszerelt állapotban a felfogató pontjai leszerelés után, Saját kép

- [11.Kép]: Habosított alumínium, Saját kép
- [12.Kép]: A CT által készített felvételen a próbatest keresztmetszete, Saját kép
- [13.Kép]: A 3D nyomtatott alumínium metszeti rajza, Saját gyártású kép
- [14.Kép]: A kiegészítő páncélzat metszeti rajza, Saját gyártású kép
- [15.Kép]: A szimulációs lőszertípusok háromdimenziós modelljei, Saját gyártású kép
- [16.Kép]: A 3UBR8 találatának szimulációja a páncélzat törése pillanatában, Saját gyártású kép
- [17.Kép]: A 3UBR8 találata, piros pontként láthatóak a repeszek a páncélzaton kívül a deformálódott lövedékkel, Saját kép
- [18.Kép]: A 3VBM-17 átütése a képlékenyen deformálódott páncéllemezzel és lövedékkel, piros ponttal pedig a repeszek láthatóak, Saját kép
- [19.Kép]: A páncélzaton látható a feszültség eloszlása az átütés során, Saját kép
- [20.Kép]: A 3VBM-17 átütése a kiegészítő páncélzaton, a repeszek iránya megfigyelhető a páncélzat alakváltozásával, Saját kép
- [21.Kép]: A 3VBM-17 folytatja az útját az alváz irányába, a piros pontokkal jelölt repeszek a küzdőtér alatt maradnak, Saját kép
- [22.Kép]: A töltet robbanásának szimulációja a kezdő állapotban, Saját kép